模拟增温对青藏高原高寒草甸土壤 C、N、P 化学计量特征的影响

秦瑞敏，温静，张世雄，杨晓艳，徐满厚

（太原师范学院地理科学学院，山西 晋中 030619）

摘要 高寒草甸生态系统对气候变化响应极为敏感，其中土壤 C、N、P 化学计量特征能更深刻地反映生态系统变化的过程。本文在青藏高原北麓河地区采用红外线辐射器对高寒草甸进行了 8 a 的模拟增温试验，于每年 9 月初采集试验区土壤样品，测定土壤有机碳（SOC）、全氮（TN）、全磷（TP）含量，从短期增温（3 a）和长期增温（8 a）两个时间尺度分析其化学计量特征，以探究模拟增温对高寒草甸土壤养分的影响。结果表明：（1）增温显著提高了 0 cm 和 5 cm 的土层温度（$P<0.05$），增温效果随土层深度增加而减弱，空气温度变化仅在短期增温下达到显著水平（$P<0.05$）。（2）从总土层来看，短期增温下 C、N、P 含量分别减小 1.53%、0.25%、2.59%，C:P 和 N:P 分别增大 2.10%和 3.18%（$P>0.05$）；长期增温下 C、N 含量分别增加 1.89%、2.68%，P 含量减小 2.81%，C:P 和 N:P 分别增大 6.02%和 6.12%（$P>0.05$）。因此，长期增温下 C、N、P 化学计量特征的变化幅度大于短期增温。（3）从各土层的 C、N、P 含量来看，短期增温下 0~20 cm 土层各元素含量呈减小趋势，20~30 cm 土层各元素含量均呈增加趋势，表明短期增温下 C、N、P 有向下层转移的趋势；长期增温下 0~30 cm 各土层 C、N 含量总体呈增加趋势，P 含量呈减小趋势，但 20~30 cm 土层各元素增幅较短期增温减小，表明长期增温下 C、N、P 向下层转移的趋势有所减弱。（4）从各土层的化学计量比来看，短期增温下 0~20 cm 土层 C:P 和 N:P 整体呈减小趋势，20~30 cm 土层呈增加趋势，长期增温下各土层 C:P 和 N:P 均呈增加趋势。由此可见，随增温时间的延长，总土层 C、N、P 及其化学计量比变化幅度增大，但在不同土层变化趋势不一致，C、N、P 总体呈现出向下层转移的趋势。

关键词 高寒草甸；土壤；模拟增温；化学计量；青藏高原

气候变暖是当前最严重的全球环境问题之一，IPCC 第五次评估报告指出，2003—2012 年全球海陆表面平均温度比 1850—1900 年上升了 0.78℃[1]，且在高纬度和高海拔地区增温幅度会更大[2]，全球陆地生态系统也会随之发生变化。土壤作为陆地生态系统重要的组成单元，是植物生长的载体及所需养分的主要来源，对植物具有重要的调节和驱动作用[3]。其中，土壤中碳（C）、氮（N）、磷（P）是影响植物生理代谢、生长发育的重要因素，研究土壤各元素的耦合关系及动态平衡，可为植物赖以生存的物质基础和重要的环境条件提供可持续经营依据[4]，也是生态化学计量学在探究生态系统中物质循环、能量平衡以及生物与环境关系的重要途径[6]。一般来讲，土壤有机质 C:N 与其分解速度成反比关系，N:P 可用作氮饱和的诊断指标，也可用于确定养分限制的阈值[7]，但目前关于土壤 C、N、P 化学计量特征对模拟增温响应的研究非常有限。

收稿日期：2019-12-26；修订日期：2020-03-31
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目（41501219）；山西省高等学校哲学社会科学研究项目（2019W134）；山西省软科学研究一般项目（2018041072-1）；太原师范学院研究生教育创新项目（SYYJSJC-2011）共同资助
作者简介：秦瑞敏（1995-），男，硕士研究生，研究方向为区域气候变化及其影响. E-mail：qinruimin1995@163.com
通讯作者：徐满厚. E-mail：xumh@tynu.edu.cn

因此，研究模拟增温对土壤养分元素含量及其化学计量比变化的影响具有重要意义。

不同增温时长对陆地生态系统的影响具有差异性[8]。已有的短期增温（1~3 a）研究发现，增温促进了微生物对有机质的分解，导致土壤 C 含量减少[10]；也有研究发现，由于增温使植物和地下微生物生长繁殖受限，植物凋落物增多，导致土壤表层 C 和 N 含量增加[12]，P 含量变化不一[10]。在长期增温（5 a 以上）的研究中，增温使土壤有机质和 N 含量有减少趋势，P 含量变化不一[13]；还有研究发现，长期增温下土壤 C 含量呈增加趋势[16]。总之，由于研究区域、增温方式、植被类型、采样方法等的不同，土壤各养分元素变化对不同年限增温的响应规律并不一致，研究结果也较为复杂。土壤作为植物的养分来源，会影响植被特征[11]、物候[17]等，因而有必要在长期增温的基础上研究土壤 C、N、P 化学计量特征对短期和长期增温响应的差异。

青藏高原是世界上海拔最高的高原，被称为“世界第三极”，是全球气候变暖的敏感区域[18]，1971—2011 年青藏高原年平均气温升温幅度达 0.39℃·（10a）$^{-1}$，明显高于中国近百年升温幅度[0.08℃·（10a）$^{-1}$][21]。作为青藏高原典型的地带性植被，高寒草甸是适应高原隆起与长期低温环境形成的特殊产物[22]，对气候变化和人类活动响应极为敏感，也是研究陆地生态系统对气候变化响应机制的理想场所[23]。为探究高寒草甸土壤中主要养分元素对气候变暖的响应，本研究选取青藏高原北麓河地区的典型高寒草甸进行长期模拟增温试验，并从短期（3 a）和长期（8 a）两个时间尺度探究模拟增温对土壤 C、N、P 化学计量特征的影响，为高寒地区生态系统的保护和合理利用，为防治草地土壤退化和土地沙漠化发生提供理论参考和科学依据。

1　材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院冻土工程国家重点实验室青藏高原研究基地(简称北麓河试验站,图 1a),地理坐标为 34°49′33.98″~34°49′36.58″N，92°55′57.19″~92°56′06.32″E，平均海拔 4630 m。该地属于青藏高原干寒气候区，年均气温为-5.9 ℃，年均降水量 267.6 mm，年均潜在蒸发量 1316.9 mm，年均风速 4.1 m·s^{-1}，冻结期为 9 月至次年 4 月[25]。植被属高寒草甸类型，以莎草科（Cyperaceae）和菊科（*Asteraceae*）的植物为主，其中，高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)为建群种，伴生有矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、美丽风毛菊(*Saussurea pulchra*)、细小棘豆(*Oxytropis pusilla*)等，植被覆盖度达 83%。该区主要土壤类型为高山灌丛草甸土、高山草甸土、高山草原化草甸土等，在河谷、湖盆低洼地带发育沼泽化草甸土，在山地形成栗钙土，分布也较为普遍，河源区土层厚度较浅，受高寒气候条件的影响，土壤成土过程缓慢，成土母质一般为残积－坡积、冰渍或冲洪积物，粗骨性强，土壤中腐殖质较浅且分解速度慢，土壤有机质成分主要分布在表层（30 cm 以上）[26]，表层具有 5~15 cm 厚草皮层，土层一般为 4~6 cm，有机质含量达 8~25 g·kg^{-1}；表层以下常夹带大量砾石，呈 As-A1-C/D 结构，B 层发育不明显[25]。

1.2 样地设置

实验样地设在距北麓河试验站约 300 m 的典型高寒草甸地段，植被分布均匀，地势较为平坦，未受放

牧、鼠兔啃食等干扰。增温实验采用红外线辐射器，用于真实模拟全球气候变暖中增强的向下红外线辐射，能量辐射到地表可改变地面温度。实验采用随机区组设计，设置对照（CK）和增温（W）两种处理，每种处理 5 个重复，共计 10 个样地，每个样地面积为 2 m×2 m（图 1c）。增温样地（W）正上方距地面 1.5 m 高度处架设红外线辐射器，对照样地（CK）只设灯架，用于消除增温处理中灯架遮阴对植被的影响；距地面 1 m 高度处架设红外地表温度传感器，测定下垫面温度；距地面 20 cm 高度处架设 HMP45C 温湿度探头，测定此高度处的空气温度和相对湿度；土壤中布设 109SS-L 温度探头测定 0、5、15、30、60、100 cm 深度土壤温度。采用 CR1000 数据采集仪进行数据采集，频度为 10 min 采集 1 次（图 1b）。在增温样地外部空旷处架设一小型生态气象观测站，用于常规气象数据观测。增温样地和小型生态气象观测站均用铁丝网围拦，以防破坏，整个实验样地于 2010 年 6 月完成设置[27]。增温试验于 2010 年 7 月 1 日 8 : 30 开始，全天 24 h 持续增温，且白天和夜间的增温幅度不变；于 2018 年 9 月 30 日 9 : 00 截止，共连续增温 8 a。

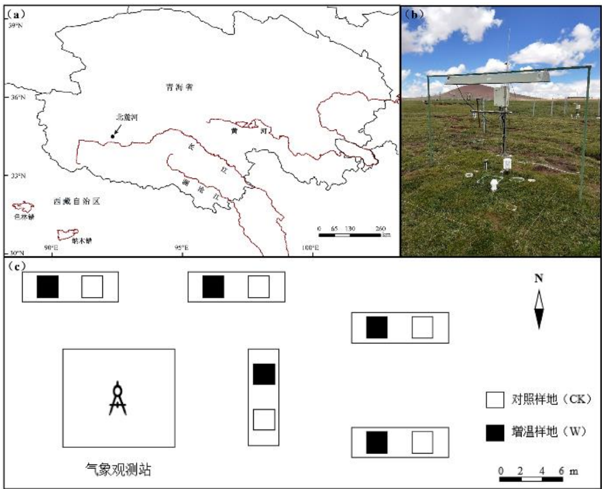


图 1 研究区域地理位置及样地设计示意图

Fig.1 Geographical position and design sketch of sample site

1.3 测定内容及方法

1.3.1 空气-土壤温度测定

在对照和增温样地距地面 20 cm 高度处架设温度探头，测定此高度处的气温；在样地土壤中布设温度探头，测定 0、5、15、30、60、100cm 深度土壤温度。使用生长季（5—9 月）每日平均气温数据进行处理，求取土壤各深度层次的生长季均温值，用以观测红外线辐射器的增温效果。

1.3.2 土样采集及理化性质测定

土样采集时间为每年 9 月初，受天气影响，每年取样时间基本固定，日期相差 1~2 d，即分别于 2012 年 9 月 5 日、2013 年 9 月 3 日、2016 年 9 月 4 日、2017 年 9 月 3 日、2018 年 9 月 5 日进行土样采集。使用土钻法在对照和增温样地内用直径为 7 cm 的土钻按照 0~10、10~20、20~30 cm 的层次进行随机取样。将土壤样品装袋带回实验室进行风干、过筛（60 目，0.28 mm）等处理，然后进行理化性质的测定。其中，土壤有

机碳含量测定采用重铬酸钾容量法（外加热法），全氮采用开氏定氮法测定，全磷测定采用高氯酸–硫酸–钼锑抗比色法测定[28]。

1.4 数据分析

数据统计和分析使用 Office Excel 2016 和 SPSS 20.0 统计软件，采用 Origin 8.0 软件绘图。

变异系数 C_v 的划定：C_v 值在 0~15%为小变异，16%~35%为中等变异，大于 36%为高度变异。

2　结果与分析

2.1 红外线辐射器的增温效应

2.1.1 采样期间对照样地温度变化

增温初期（2012—2013 年）和增温末期（2016—2018 年）对照样地空气温度分别为 5.29 ℃和 5.23 ℃，末期较初期降低 0.06 ℃，变化未达到显著水平（P＞0.05）（表 1）。增温末期对照样地土壤 0 cm 温度较增温初期降低 0.91 ℃，5~30 cm 土层温度较增温初期升高 0.02~0.78 ℃，土壤温度变化均未达到显著水平（P＞0.05）（图 2）。因此，增温末期对照样地温度和土壤 0 cm 温度较初期有降低趋势，5~30 cm 土层温度较初期有升高趋势，但变化均未达到显著水平。

表 1　不同增温阶段对照样地温度（距地面 20 cm）

Table 1　Temperature of control plots in different warming time（20 cm above the ground）

	增温初期		增温末期		
	2012 年	2013 年	2016 年	2017 年	2018 年
温度/℃	5.05±0.02	5.52±0.03	5.48±0.06	4.79±0.06	5.41±0.08

2.1.2 采样期间增温样地温度变化

在增温初期和增温末期空气温度分别提高 0.30 ℃（P＝0.021）和 0.06 ℃（P＝0.659），表明红外线辐射器能够提高温度，但仅在短期增温下能够达到显著水平，并且随着增温时间延长，增温效应逐渐减弱。

红外线辐射器对 0~100 cm 土层温度均有提高作用，但仅显著增加了土壤 0~5 cm 温度。在增温初期和末期，土壤 0 cm 深度温度分别显著升高 2.45 ℃（P＝0.000）和 2.15℃（P＝0.003），5 cm 深度温度分别显著升高 1.60 ℃（P＝0.007）和 1.24 ℃（P＝0.016），而在 100 cm 深度温度仅略升高 0.61℃（P＝0.142）和 0.33 ℃（P＝0.325）（图 2）。整体而言，红外线辐射器对温度的短期增温幅度大于长期增温，对浅层土壤温度的增温幅度大于深层，且增温效果随土层深度增加逐渐减弱。

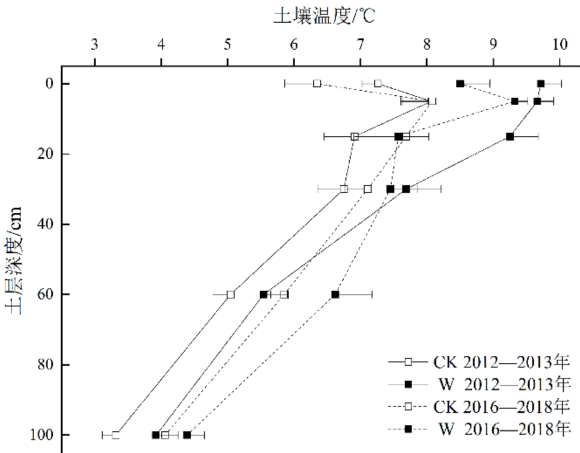


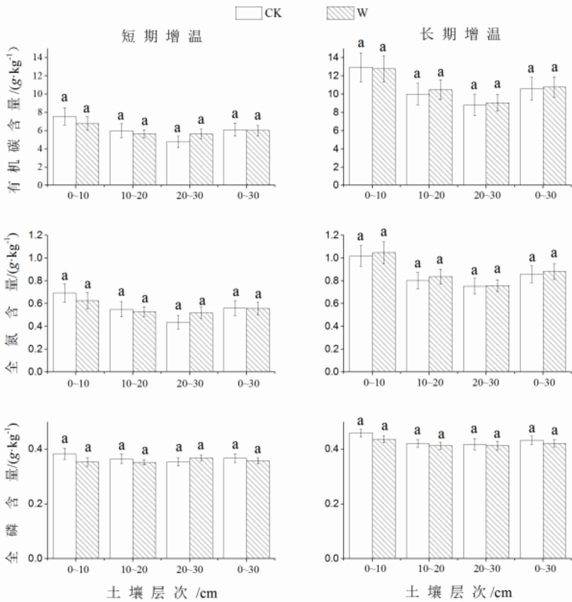
图 2 增温作用下土壤温度与土层变化的关系

Fig. 2 Effect of warming on soil temperature with soil layer changing

2.2 增温对土壤 C、N、P 含量的影响

2.2.1 增温对总土层 C、N、P 含量的影响

土壤 0~30 cm 深度范围内，C、N、P 总含量对增温的响应存在差异，但统计均未达到显著水平（$P>0.05$）。增温对 C 和 N 有相似的影响，在短期增温下分别减少 1.53%和 0.25%，在长期增温下分别增加 1.89%和 2.68%，C、N 含量增幅较短期增温更大；增温使 P 含量有下降趋势，短期增温下减少 2.59%，而长期增温下减少 2.81%，P 含量减幅较短期增温有所增大（图 3）。总体来看，长期增温下 C、N、P 含量的变化幅度均大于短期增温。



注：不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$），下同。

图 3 模拟增温对高寒草甸土壤 C、N、P 含量变化的影响

Fig. 3 Effect of warming on soil C、N、P content on alpine meadow

2.2.2 增温对各土层 C、N、P 含量的影响

土壤各层 C、N、P 含量对短期增温的响应基本一致，而长期增温下土壤 C、N、P 含量变化具有差异性，含量变化均未达到显著水平（P>0.05）(图 3)。各土层 P 有较高的稳定性（C_v=15.23%），属中等变异；而 C（C_v=52.12%）和 N（C_v=40.56%）含量变化较大（表 2）。

表 2　土层间 C、N、P 化学计量特征变异系数

Table 2　Coefficient of variation of C、N、P stoichiometric characteristics in different soil layers

项　目	C	N	P	C：N	C：P	N：P
变异系数/%	52.12	40.56	15.23	20.94	42.57	28.23

在 0~10 cm 土层，短期增温下土壤 C、N、P 含量呈减小趋势，分别为 10.60%、9.58%和 7.74%，而长期增温下 C 和 P 分别减小 1.27%和 5.03%，N 增加 2.86%，各元素减幅较短期增温有所减小。在 10~20 cm 土层，短期增温下土壤 C、N、P 含量同样呈减小趋势，分别为 6.06%、3.95%和 3.62%，而在长期增温下 C 和 N 分别增加 4.94%和 4.28%，P 减小 2.00%，各元素减幅较短期增温有所减小。在 20~30 cm 土层，短期增温下土壤 C、N、P 呈增加趋势，分别为 18.60%、19.21%和 4.04%，在长期增温下这种趋势有所减缓，C 和 N 分别增加 3.07%和 0.73%，而 P 减小 1.19%。因此，短期增温下 0~20 cm 土层 C、N、P 含量呈减小趋势，20~30 cm 土层呈增加趋势，表明各元素有向下层转移的趋势；而长期增温下各元素减幅有所减小，表明各元素向下层转移的趋势有所减缓（图 3）。

2.3 增温对土壤 C、N、P 化学计量比的影响

2.3.1 增温对总土层 C、N、P 化学计量比的影响

增温处理下 0~30 cm 总土层 C:N 变化不大，短期增温下减小 0.44%，长期增温下增加 0.70%，且统计未达显著水平（P>0.05），各层稳定性较强（C_v=20.94%）（表 2）。短期增温下，C:P 和 N:P 有增大趋势，增幅分别为 2.10%和 3.18%，在长期增温下两者增幅均有所增大，分别为 6.02%和 6.12%，但统计均不显著（P>0.05）（图 4）。总体来看，长期增温下 C、N、P 化学计量比的变化幅度均大于短期增温。

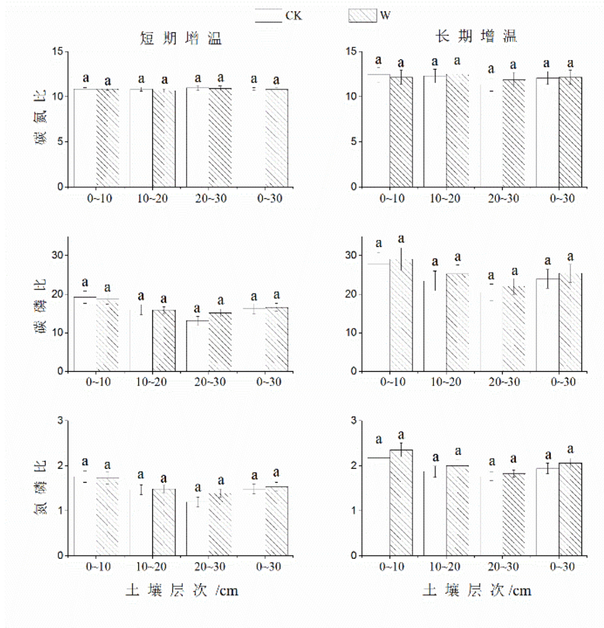


图 4 模拟增温对高寒草甸土壤 C、N、P 化学计量比的影响

Fig. 4 Effect of warming on soil C、N、P stoichiometric ratio on alpine meadow

2.3.2 增温对各土层 C、N、P 化学计量比的影响

各土层化学计量比对增温的响应具有差异性，且统计均未达显著水平（$P>0.05$）。短期增温下各土层 C:N 变化较小，长期增温下 0~10 cm 土层 C:N 减小 2.19%，10~20 cm 和 20~30 cm 土层分别增加 1.78%和 4.64%。C:P 和 N:P 对增温的响应具有相似性，在 0~10 cm 土层，短期增温下 C:P 和 N:P 分别减小 2.41%和 1.68%，长期增温下分别增加 4.52%和 8.16%；在 10~20 cm 土层，短期增温下 C:P 和 N:P 分别减小 1.07%和增加 0.97%，而在长期增温下分别增加 7.62%和 6.96%；在 20~30 cm 土层，短期增温下 C:P 和 N:P 分别增加 15.55%和 16.17%，而在长期增温下分别为 7.42%和 3.27%，较短期增温有所减小（图 4）。总体来讲，短期增温下 0~20 cm 土层 C:P 和 N:P 呈减小趋势，20~30 cm 土层呈增加趋势，长期增温下各土层 C:P 和 N:P 均呈增加趋势，表明 C:P 和 N:P 可以作为研究区土壤养分响应温度变化的重要指标。

3 讨论

3. 1 红外线辐射器的增温效应

红外线辐射器通过悬挂在样地上方的灯管向样地散发红外线辐射，从而达到增温的目的[28]，它可以模拟全球变化的增温机制和日变化，对土壤及植物无物理干扰，且不改变小气候状况[30]。本研究中，红外线辐射器对高寒草甸土壤浅层（0~5 cm）温度具有显著影响，在 0 cm 和 5 cm 土层深度，增温样地较对照分别提高了 2.40 ℃和 1.15 ℃（$P<0.05$），这与在美国密歇根州北部泥炭地[31]和我国松嫩草地生态系统[32]开展的红外线辐射器增温实验结果及增温趋势一致，其增温效果在 IPCC（2013）报告中预测 21 世纪末全球温度将增加 1.1~6.4℃的范围之内[1]。

3.2 增温对土壤 C、N、P 含量及垂直分布的影响

气候变化引起的土壤养分变化会对高寒生态系统过程产生重要影响[33]，温度作为影响土壤养分变化的重要因素，影响着土壤的各种生理生化过程[11]，进而会对各养分元素含量及其化学计量比产生相应的影响。由于土壤全氮来源于土壤植物残体分解和合成的有机质，因此，土壤碳氮的变化具有一致性[34]。本研究中，长期增温下 0~30 cm 总土层 C、N、P 含量变化幅度大于短期增温，表明长期增温对土壤养分的影响要大于短期增温[34]。短期增温下总土层 C、 N 含量呈减小趋势，但在长期增温下呈增加趋势，这是因为短期增温下微生物活性增强，加快了土壤 C、N 的分解速率，导致 C、N 含量降低[36]，但随着增温时间的延长，增温效应逐渐减弱[37]，微生物活性较短期增温有所降低，植被凋落物分解进入土壤的 C 和 N 含量大于土壤微生物分解的量，从而使土壤 C、N 含量呈增加趋势；增温使土壤全磷呈减小趋势，表明增温促进了植物对 P 的吸收，这与贝昭贤等[38]研究结论一致。本研究发现，短期增温下 0~20 cm 土层 C、N 含量减小，说明短期的温度升高促进了土壤微生物对有机质的分解，从而导致 C、N 含量减少，这与江肖洁等[10]和欧阳青等[11]的短期增温试验结论基本一致。20~30 cm 土层 C、N 含量在短期增温下呈增加趋势，这是由于植被根系生物量的增幅在增温下趋于向土壤下层[39]，下层根系的分解作用使土壤 C、N 含量增加。在长期增温下，0~20 cm 土层 C、N 含量呈增加趋势，这是由于增温会显著促进 C、N 循环速率，且这种增温效应在增温前期尤为明显，但随着时间的延长，增温效应逐渐减弱[37]，根系分解速率降低，从而使 C、N 向下转移趋势也随之减缓，体现在 10~20 cm 土层 C、N 含量增加，20~30 cm 土层 C、N 含量增幅减小。

3.3 增温对土壤 C、N、P 化学计量比的影响

土壤 C、N、P 变化是土壤–植被生态系统养分循环的重要环节[37]，也是指示植被、凋落物和土壤之间 C、N、P 循环的重要指标，有利于判定土壤限制性元素、养分调控因素，以及认识植物吸收过程和体内养分之间的交互作用[7]。笔者研究发现，土壤各层 C:N 有着较强的稳定性（C_v=20.94%），表明土壤有机碳和全氮作为结构性成分，对增温作用的响应并不敏感[41]，保持了较稳定的比例关系。本研究中，0~20 cm 土层 C:P 和 N:P 在短期增温下变化较小，而在长期增温下各土层 C:P 和 N:P 均有不同程度增加，表明增温影响下 C、N 相对充裕而 P 相对较少，增温作用会加速土壤 P 流失，且长期持续性的增温还将增大这一趋势。因此，C:P 和 N:P 可以作为本研究区限制性养分判断的重要指标，董雪等[4]在对沙漠灌木群落土壤化学计量的研究中也有相似的观点。

4　结论

本研究以青藏高原高寒草甸为对象进行模拟增温试验，研究了红外线辐射器的增温效果和高寒草甸土壤化学计量特征对模拟增温的响应，得到以下结论：

（1）红外线辐射器对空气和土壤温度均有提高作用，但随着增温时间的延长，增温效应逐渐减弱。空气温度仅在短期增温下显著提高；土壤温度在长期增温下的变化幅度小于短期增温，其中 0~5 cm 土层温度

显著升高。

（2）增温使土壤 C、N、P 含量发生变化，且长期增温下总土层养分含量变化幅度大于短期增温。从各土层来看，短期增温促进了植物对表土养分的吸收利用，使各养分元素有向下层转移的趋势；随着增温时间延长，根系分解速率因增温效应减弱而降低，各养分元素向下层转移的趋势也有所减缓。

（3）C、N、P 化学计量比对增温的相应存在差异性，长期增温下总土层的化学计量比变化幅度大于短期增温。C:N 对增温响应并不敏感，保持较为稳定的比例关系；短期增温下各土层 C:P 和 N:P 变化均较小，而在长期增温下均呈增加趋势，故可将 C:P 和 N:P 作为本研究区限制性养分判断的重要指标。

参考文献（References）

[1] IPCC. Climate Change 2013: the Physical Science Basis[R] Working group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 2014.

[2] Thomas C D, Cameron A, Green R E, et al. Extinction risk from climate change [J]. Nature, 2004, 427(6970): 145-148.

[3] 杨新芳，鲍雪莲，胡国庆，等.大兴安岭不同火烧年限森林凋落物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1359-1367.[Yang Xinfang, Bao Xuelian, Hu Guoqing, et al. C：N：P stoichiometry characteristics of litter and soil of forests in Great Xing'an Mountains with different fire years[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1359-1367.]

[4] 董雪，郝玉光，辛智鸣，等.科尔沁沙地 4 种典型灌木灌丛下土壤碳、氮、磷化学计量特征[J].西北植物学报, 2019, 39(1): 164-172.[Dong Xue, Hao Yuguang, Xing Zhiming, et al. Stoichimetric characterstics of soil carbon，nitrogen and phosphorus of four typical shrubs in horqin sandy land[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2019, 39(1): 164-172.]

[5] 李浙华，李生宇，李丙文等.不同植被覆盖度沙垄土壤化学性质的空间分异[J].干旱区研究, 2019, 37(1): 160-167.[Li Zhehua, Li Shengyu, Li Bingwen, et al.Spatial patterns for soil chemical properties of different vegetation coverage dunes at the southwestern edge of Gurbantunggut Desert[J].Arid Zone Research， 2019, 37(1): 160-167.]

[6] 张泰东，王传宽，张全智.帽儿山 5 中林型土壤碳氮磷化学计量关系的垂直变化[J].应用生态学报, 2017, 28(10): 3135-3143.[Zhang Taidong, Wang Chuankuan, Zhang Quanzhi. Vertical variation in stoichimetric relationships of soil carbon, nitrogen and phosphorus in five forest types in the Maoershan region, Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(10): 3135-3143.]

[7] 王绍强，于贵瑞.生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J].生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.[Wang Shaoqiang, Yu Guirui.Ecological stoichiometry characterstics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947.]

[8] 徐满厚，刘敏，薛娴，等. 增温、刈割对高寒草甸地上植被生长的影响[J].生态环境学报, 2015, 24(2): 231-236.[Xu Manhou, Liu Min, Xue Xian, et al. Effects of warming and clipping on the growth of aboveground vegetation in an alpine meadow[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(2): 231-236.]

[9] 马彩霞，刘洪杰，郑海峰，等. 川西高山林线土壤活性碳、氮对短期增温的响应[J].应用生态学报, 2019, 30(3): 718-726.[Ma Caixia, Liu Hongjie, Zheng Haifeng, et al. Responses of soil active carbon and nitrogen to short-term warming in alpine treeline of west Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3): 718-726.]

[10] 江肖洁，胡艳玲，韩建秋，等. 增温对苔原土壤和典型植物叶片碳、氮、磷化学计量学特征的影响[J].植物生态学报，2014，38(9): 941-948.[Jiang Xiaojie, Hu Yanling,Han Jianqiu, et al. Effects of warming on carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in tundra soil and leaves of typical plants[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(9): 941-948.]

[11] 欧阳青，任健，尹俊，等.短期增温对亚高山草甸土壤养分和脲酶的影响[J].草业科学, 2018, 35(12): 2794-2800.[Ouyang Qing, Ren Jian, Yin Jun,et al. Effect of short-term simulated tempurature enhancement on soil nutrients and urease activity of sub-alpine meadow[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(12): 2794-2800.]

[12] 李娜，王根绪，高永恒，等.模拟增温对长江源区高寒草甸土壤养分状况和生物学特性的影响研究[J].土壤学报, 2010, 47(6): 1214-1224.[Li Na, Wang Genxu, Gao Yongheng, et al. Effects of simulated warming on soil untrients and biological characteristics of alpine meadow soil in the head waters region of the Yangtze River[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(6): 1214-1224.]

[13] 杨月娟，周华坤，姚步青，等.长期模拟增温对矮嵩草草甸土壤理化性质与植物化学成分的影响[J].生态学杂志, 2015, 34(3): 781-789.[Yang Yuejuan, Zhou Huakun, Yao Buqing, et al. Effects of long-term simulated warming on soil physicochemical properties and plant chemical components of *Kobresia humilis* meadow[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(3): 781-789.]

[14] 赵艳艳，周华坤，姚步青，等.长期增温对高寒草甸植物群落和土壤养分的影响[J].草地学报, 2015, 23(4): 665-671.[Zhao Yanyan, Zhou Huakun, Yao Buqing, et al. The influence of long-term simulating warming to the plant community and soil nutrient of alpine meadow[J]. Acta Agrestia Sinica, 2015, 23(4): 665-671.]

[15] 杨有芳，字洪标，罗雪萍，等.川西北高寒草甸土壤养分和微生物群落功能[J].西南民族大学学报（自然科学版）, 2018, 44(5): 441-449.[Yang Youfang, Zi Hongbiao, Luo Xueping, et al. Responses of soil nutrient

and soil microbial functional diversity to warming in an alpine meadow on northwestern plateau of Sichuan province[J]. Journal of Southwest Minzu University（Natural Science Edition）, 2018, 44(5): 441-449.]

[16] 余欣超，姚步青，周华坤，等.青藏高原两种高寒草甸地下生物量及其碳分配对长期增温的响应差异[J].科学通报, 2015, 60(4): 379-388.[Yu Xinchao C, Yao Buqing, Zhou Huakun, et al. Variable responses to long-term simulated warming of underground biomass and carbon allocations of two alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(4): 379-388.]

[17] 章志龙，刘旭东，贾 鹏，等.氮添加对高寒草甸植物花期物候和群落结构的影响[J].草业科学, 2013, 30(5): 728-735.[Zhang Zhilong, Liu Xudong, Jia Peng, et al. Effects of nitrogen addition on flowering phenology, functional traits and community structure of alpine meadow in the Eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Pratacultural Science, 2013, 30(5): 728-735.]

[18] 张金霞，曹广民，周党卫，等. 高寒矮嵩草草甸大气-土壤-植被-动物系统碳素储量及碳素循环[J].生态学报, 2003, 23(4): 627-634.[Zhang Jinxia, Cao Guangmin, Zhou Dangwei, et al. The carbon storage and carbon cycle among the atmosphere, soil, vegetation and animal in the *Kobresia humilis* alpine meadow ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(4): 627-634.]

[19] 宋双双，孙保平，张建锋，等.保水剂与微生物菌剂对土壤水分、养分的影响[J].干旱区研究, 2018, 35(4): 761-769.[Song Shuangshuang, Sun Baoping, Zhang Jianfeng, et al. Effects of water-retaining agent and microbial agent on soil moisture and nutrient content[J].Arid Zone Research, 2018, 35(4): 761-769.]

[20] 郑度，赵东升.青藏高原高寒荒漠地带与寒冷干旱核心区域[J].干旱区研究, 2019, 36(1): 1-6.[Zheng Du, Zhao Dongheng. The high cold desert zone and a cold-arid core area of the Tibetan Plateau[J].Arid Zone Research, 2019, 36(1): 1-6.]

[21] 郑然，李栋梁，蒋元春.全球变暖背景下青藏高原气温变化的新特征[J].高原气象, 2015, (6): 1531-1539.[Zheng Ran, Li Dongliang, Jiang Yuanchun. New characteristics of temperature change over Qinghai-Xizang Plateau on the background of global warming[J]. Plateau Meteorology, 2015, (6): 1531-1539.]

[22] 崔树娟，布仁巴音，朱小雪，等.不同季节适度放牧对高寒草甸植物群落的影响[J].西北植物学报, 2014, 34(2): 349-357.[Cui Shujuan, Bu Renbayin, Zhu Xiaoxue, et al. Effcets of seasonal moderate grazing on plant community of alpine meadow[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(2): 349-357.]

[23] Qiu J. China: the third pole [J]. Nature, 2008, 454(7203): 393–396.

[24] 李娜，王根绪，杨燕，等.短期增温对青藏高原高寒草甸植物群落结构和生物量的影响[J].生态学报, 2011, 31(4): 0895-0905.[Li Na, Wang Genxu, Yang Yan, et al. Short-term effects of temperature enhancement on community structure and biomass of alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica,

2011, 31(4): 0895-0905.

[25] 赵新全．高寒草甸生态系统与全球变化[M].北京：科学出版社，2009.[Zhao Xinquan. Alpine Meadow Ecosystem and Global Change [M]. Beijing: Science Press, 2009.]

[26] 王一博，吴青柏，牛富俊．长江源北麓河流域多年冻土区热融湖塘形成对高寒草甸土壤环境的影响[J].冰川冻土, 2011, 33(3): 659-667.[Wang Yibo, Wu Qingbai, Niu Fujun. The impact of therokarst lake formation on soil environment of alpine meadow in permafrost regions in the Beiluhe Basin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 659-667.]

[27] 徐满厚，薛娴.青藏高原高寒草甸夏季植被特征及对模拟增温的短期响应[J].生态学报, 2013, 33(7): 2071-2083.[Xu Manhou, Xue Xian. A research on summer vegetation characteristics & short-time responses to experimental warming of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2071-2083.]

[28] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京：中国农业出版社，2000.[Bao Shidan. Study of Analysis of Soil and Agrochemistry [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.]

[29] Shaver G R, Canadell J, Chapin F S,et al.Global warming and terrestrial ecosystems: a conceptual framework for analysis[J]. BioScience, 2000, 50(10): 871-882.

[30] 牛书丽，韩兴国，马克平，等.全球变暖与陆地生态系统研究中的野外增温装置[J].植物生态学报, 2007, 3(2): 262-271.[Niu Shuli, Han Xingguo, Ma Keping, et al. Field facilities in global warming and terrestrial ecosytem research[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 3(2): 262-271.]

[31] Johnson C P, Pypker T G, Hribljan J A, et al. Open Top Chambers and Infrared Lamps: A Comparison of Heating Efficacy and CO_2/CH_4 Dynamics in a Northern Michigan Peatland[J]. Ecosytems, 2013, 16(5): 736-748.

[32] Zhang N, Guo R, Song P, et al. Effects of warming and nitrogen deposition on the coupling mechanism between soil nitrogen and phosphorus in Songnen Meadow Steppe, northeastern China[J].Soil Biology and Biochemistry, 2013, 65: 96-104.

[33] 王鑫，杨德刚，熊黑钢等.新疆不同植被类型土壤有机碳特征[J].干旱区研究，2017, 34(4): 782-788.[Wang Xin, Yang Degang, Xiong Heigang, et al. Characteristics of soil organic carbon under different vegetation types in Xinjiang[J].Arid Zone Research, 2017, 34(4): 782-788.]

[34] 李佳佳，樊妙春，上官周平.黄土高原南北样带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量变化特征[J].生态学报, 39(21): 1-7.[Li Jiajia, Fan Miaochun, Shangguan Zhouping. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus of the *Robinia pseudoacacia* forest on the north-south strip of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 39(21): 1-7.]

[35] 钞然，张东，陈雅丽等.模拟增温增雨对典型草原土壤酶活性的影响[J].干旱区研究, 2018, 35(5): 1068-1074.[Chao Ran, Zhang Dong, Chen Yali, et al. Effects of Simulated Temperature and Precipitation Increase on Soil Enzyme Activity in Typical Steppe.[J].Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1068-1074.]

[36] 丁雪丽，韩晓增，乔云发，等. 农田土壤有机碳固存的主要影响因子及其稳定机制[J].土壤通报, 2012, 43(3): 737-744.[Ding Xueli, Han Xiaozeng, Qiao Yunfa, et al. Sequestration of organic carbon in cultivated soils: main factors and their stabilization mechanisms[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(3): 737-744.]

[37] 侯彦会，周广胜，许振柱.基于红外增温的草地生态系统响应全球变暖的研究进展[J].植物生态学报, 2013, 37(12): 1153-1167.[Hou Yanhui, Zhou Guansheng,Xu Zhenzhu. An overview of research progress on responses of grassland ecosystems to global warming based on infrared heating experiments[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(12): 1153-1167.]

[38] 贝昭贤，张秋芳，郑蔚，等.模拟增温对中亚热带杉木人工林土壤磷有效性的影响[J].生态学报，2018，38(3): 1106-1113.[Bei Zhaoxian, Zhang Qiufang, Zheng Wei, et al. Effects of simulated warming on soil phosphorus availability in subtropical Chinese fir plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 1106-1113.]

[39] 徐满厚，刘敏，翟大彤等.模拟增温对青藏高原高寒草甸根系生物量的影响[J].生态学报, 2016, 36(21): 6812-6822.[Xu Manhou, Liu Min, Zhai Datong, et al. Effects of experimental warming on the root biomass of an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(21): 6812-6822.]

[40] 苏原，罗艳，耿凤展等.天山高寒草原植物叶片氮磷化学计量特征对氮沉降的响应[J].干旱区研究, 2019, 36(2): 430-436.[Su Yuan, Luo Yan, Geng Fengzhan, et al. Response of stoichiometric characteristics of nitrogen and phosphorus in plant leaves in an alpine grasslands to nitrogen deposition in the Tianshan Mountains[J].Arid Zone Research, 2019, 36(2): 430-436.]

[41] 宁志英，李玉霖，杨红玲，等. 沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力与多样性的影响[J]. 生态学报，2019，39(10): 1-10.[Ning Zhiying, Li Yuling, Yang Hongling, et al. Stoichiometry and effects of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil of desertified grasslands on community productivity and species diversity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): 1-10.]

Effect of simulated warming on C、N、P stoichiometric characteristics of alpine meadow soil in Qinhai-Tibetan Plateau

QIN Rui-min, WEN Jing, ZHANG Shi-xiong, YANG Xiao-yan, XU Man-hou

(*Institute of Geography Science*, *Taiyuan Normal University*, *Jinzhong* 030619, *Shanxi*, *China*)

Abstract: Alpine meadow ecosystems are extremely sensitive to climate change, and soil C、N、P stoichiometric characteristics can reflect the process of ecosystem changes more profoundly. In this study, infrared radiators were used to simulate an 8-year warming experiment in the Beiluhe region of the Qinghai-Tibet Plateau. Soil samples were taken from there in early September each year to determine contents of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP). The stoichiometric characteristics were analyzed from two time scales, short-term warming (3 a) and long-term warming (8 a), to investigate the effects of simulated warming on soil nutrients in alpine meadows. The results showed that: (1) Simulated warming significantly increased the soil temperature of 0 cm and 5 cm layers (P<0.05), and the effect of warming weakened with the increase of soil depth;The change of air temperature reached significant levels only in short-term warming (P<0.05). (2) From the perspective of the total soil layer, the C, N, and P contents decreased by 1.53%, 0.25%, 2.59% respectively, and the C:P and N:P increased by 2.10%, 3.18% respectively (P>0.05); Under long-term warming, the C and N contents increased by 1.89%, 2.68% respectively, and the P content decreased by 2.81%. In general, the changes in the C, N, and P stoichiometric characteristics under long-term warming are greater than those of short-term warming. (3) In terms of stratification, the content of C, N, and P in the 0~20 cm soil layer showed a decreasing trend under short-term warming, and the content of each element in the 20~30 cm soil layer showed an increasing trend, indicating that C, N and P tend to shift to the deeper soil layer; under long-term warming, the C and N contents of all soil layers in 0~30 cm are generally increasing, but the P content is decreasing, and the increase of each element in the 20~30 cm soil layer is than those of short-term, indicating that the tendency of C, N, P to shift to the deeper soil layer has weakened under long-term warming. (4) Under the short-term warming, the C:P and N:P of the 0-20 cm soil layer are decreasing, and the 20~30 cm soil layer is increasing. Under the long-term warming, the C:P and N: P are increasing in each soil layer. As the warming time increases, the C, N, P and their stoichiometric ratios in total soil layers increase in amplitude, but the changes in different soil layers are inconsistent, and C, N, and P show a trend to shift to the deeper soil layer generally.

Key words: alpine meadow; soil; simulated warming; stoichiometry; Qinhai-Tibetan Plateau